Les applications de la nanotechnologie dans le secteur forestier

Jennifer McCrank

Canada

Les applications de la nanotechnologie dans le secteur forestier

Jennifer McCrank

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Ottawa (Ontario) K1A 0E4

Actuellement en poste à Santé Canada,
Direction générale des produits de santé et
des aliments, Bureau de la science et
de la gestion des risques, Initiative sur
l'impact environnemental,
Ottawa (Ontario) K1A 0K9

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2009
ISBN 978-1-100-91022-2
N° de cat. Fo4-27/2009F-PDF

Révision : Claire Despins
Conception graphique et mise en page : Sandra Bernier

Crédits photographiques
Couverture : Photo de billes de bois, collection de photos de la Forêt expérimentale de Petawawa, les autres photos, FPInnovations.
Page 4, collection de photos de la Forêt expérimentale de Petawawa
Pages 5–7, 10 et 12, FPInnovations

Données de catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

McCrank, Jennifer
Les applications de la nanotechnologie dans le secteur forestier [ressource électronique] / Jennifer McCrank.

Monographie électronique en format PDF.
Publ. aussi en anglais sous le titre : Nanotechnology applications in the forest sector. Comprend des réf. bibliogr.

ISBN 978-1-100-91022-2
N° de cat. Fo4-27/2009F-PDF

1. Produits forestiers — Innovations.
2. Nanotechnologie.
I. Service canadien des forêts. Direction des sciences et des programmes.
II. Titre.

SD387.N34.M3314 2009 634.9'8 C2009-980080-2

Table des matières

Introduction 4

Applications 5

Nouveaux matériaux 5

Nanofibres 5

Nanocristaux 5

Stratifiés/revêtements 5

Lignocellulose 6

Résistance du bois 6

Protection contre les ultraviolets 6

Résistance à l'humidité 6

Résistance aux ravageurs 7

Nouveaux procédés et techniques 8

Nano-indentation 8

Technique de nanorevêtement couche par couche 8

Pâtes et papiers 8

Papier intelligent 8

Systèmes de filtration 9

Couchage du papier 9

Risques pour l'environnement et la santé humaine 10

Survol des initiatives de recherche en nanotechnologie 12

Initiatives nationales de recherche 12

Initiatives internationales de recherche 13

Conclusions 13

Bibliographie 14

Introduction

La nanotechnologie est un domaine assez récent de recherche-développement (R-D). Elle offre une vaste gamme d'applications et promet d'améliorer notre qualité de vie. On a appliqué la nanotechnologie à de nombreux produits actuellement vendus sur le marché, comme certains écrans solaires, articles de sport, vêtements, produits électroniques et matériaux d'emballage qui en sont issus. Au mois d'avril 2008, plus de 600 produits de consommation à base de nanomatériaux étaient disponibles sur le marché (http://www.radio-canada.ca/nouvelles/Science-Sante/2008/07/10/001-nanomateriaux-experts.shtml). La nanotechnologie a suscité beaucoup d'intérêt dans un large éventail de disciplines, de l'électronique aux sciences des matériaux. La mise en commun de l'information entre les diverses disciplines associées profitera aux applications de la nanotechnologie. De plus, les enseignements tirés de la biotechnologie peuvent faciliter l'intégration de la nanotechnologie à la société et éviter d'éveiller la méfiance du public.

Mais qu'est donc la nanotechnologie? C'est un domaine multidisciplinaire de sciences et de technologies appliquées qui porte sur la matière à l'échelle atomique et moléculaire de l'ordre de 1 à 100 nanomètres (nm). À de telles dimensions, les particules et la matière présentent des propriétés physiques et biologiques uniques et nouvelles, différentes de celles des particules plus grandes, d'où leur importance en R-D. Ces nouvelles propriétés peuvent donc donner lieu à de nombreuses applications novatrices dans une multitude de disciplines. La nanotechnologie puise dans plusieurs disciplines, y compris le génie chimique, la physique, le génie électrique, les sciences des matériaux, la chimie, la biologie et la science des colloïdes. La plupart des gens ont de la difficulté à concevoir comment petit est vraiment un nanomètre (10^{-9} m). Le diamètre d'un globule rouge mesure environ 8 000 nm (http://www.radio-canada.ca/nouvelles/Science-Sante/2008/07/10/001-nanomateriaux-experts.shtml). L'ADN

Collection de photos de la Forêt expérimentale de Petawawa

est un exemple d'une structure naturelle d'environ 1–2 nm. Il existe également des nanoparticules synthétiques, comme les nanotubes de carbone[1] et les buckminsterfullerènes[2] mesurant de 1 à 10 nm.

Au cours des dernières années, le potentiel de développement de la nanotechnologie dans le secteur forestier est devenu apparent et réalisable. La nanotechnologie offre un moyen de mettre au point des matériaux dérivés du bois et d'améliorer les matériaux tirés de la forêt, lesquels pourraient contribuer de façon importante à l'économie forestière. De plus, de nouveaux procédés mis au point grâce à la nanotechnologie devraient révolutionner l'industrie forestière au chapitre des produits dérivés du bois, des produits dérivés de fibres, de la pâte, des papiers, des produits composites de bois, des procédés de production et des lignocelluloses fonctionnelles (Atalla et coll., 2006).

1 allotropes cylindriques du carbone moléculaire
2 allotropes sphériques du carbone moléculaire composées de 60 atomes de carbone

Applications

Nouveaux matériaux

La nanotechnologie devrait déboucher sur la mise au point d'une multitude de nouveaux matériaux utilisables dans le secteur forestier. Nombre des nanofibres, des biocomposites, des stratifiés, des résines et des produits lignocellulosiques d'un genre nouveau sont soit à l'étape de la recherche ou du développement, soit déjà sur le marché. Les progrès technologiques et les possibilités de recherche liés aux nouveaux nanomatériaux dynamiseront le secteur forestier.

Nanofibres

L'étude des nanomatériaux tirés des ressources renouvelables a récemment suscité l'intérêt. Les nanofibres et les nanofibrilles dérivées de la cellulose constituent une importante classe de nanomatériaux. La cellulose demeure l'une des plus abondantes matières premières biologiques de la Terre et pourrait devenir une solution de rechange à des matériaux non renouvelables comme la céramique ou les métaux (Wegner et Jones, 2006). La lignocellulose et la cellulose offrent un énorme potentiel comme nanomatériaux, car elles sont abondantes, renouvelables, à structure nanofibrillaire naturelle et peuvent s'autoassembler pour former des structures utiles. On peut isoler ces nanofibres et nanofibrilles à partir du procédé de fabrication de la pâte kraft et de nombreuses autres sources de cellulose (Wang et coll., 2007). Elles peuvent aussi être intégrées à divers types de polymères pour former des composites. Les nanofibres de cellulose peuvent servir d'éléments structuraux dans diverses applications (renfort du plastique, gélifiants et épaississants) (Wang et Sain, 2007). Les matières de charge organiques utilisées dans les composites constituent un produit de remplacement avantageux des matières de charge synthétiques parce qu'elles sont biodégradables et moins coûteuses, ont de bonnes propriétés thermiques et sont plus légères que leurs équivalents inorganiques (Bhatnagar et Sain, 2005). Les nanofibres de cellulose sont des éléments structurels naturels de cellulose que l'on peut tisser pour former des mats utilisables dans des composites renforcés, par exemple, une pellicule de polyalcool de vinyle, ce qui augmente considérablement la résistance à la traction. Les propriétés mécaniques des composites dépendent des propriétés des composantes individuelles (Nakagaito et Yano, 2004). Les nanofibres de cellulose ont une rigidité de 145 GPa et une résistance à la traction de 7,5 GPa (Beecher, 2007), semblables aux propriétés de résistance des nanotubes de carbone qui sont actuellement utilisés pour renforcer des matériaux. En revanche, les nanofibres de cellulose seraient beaucoup moins coûteuses à développer et sont plus légères, une caractéristique importante pour les applications dans le secteur de l'automobile, de l'aérospatiale, de la médecine, de l'industrie et de nombreuses sciences des matériaux.

Microscopie électronique par transmission de nanocristaux de cellulose, 10 nm de largeur sur 150 nm de longueur.

Nanocristaux

Les nanocristaux de cellulose, aussi appelés nanocellulose cristalline ou cellulose nanocristalline, sont utiles lorsqu'ils sont incorporés à une membrane de polysulfone, un type de polymère. D'après une étude effectuée par Noorani et coll. (2007), l'ajout de nanocristaux de cellulose augmente le module d'élasticité en traction et la perméabilité d'un composite de polysulfone. C'est là une propriété avantageuse pour la fabrication de membranes nanocomposites utilisées dans des procédés de bioséparation.

Stratifiés/revêtements

Les stratifiés de nanocomposite sont une application prometteuse dans le secteur forestier. On utilise actuellement des agents d'étanchéité, des

de différentes couleurs.

revêtements et des stratifiés pour préserver et traiter le bois (Atalla et coll., 2006). Ces produits de préservation peuvent être modifiés à l'échelle moléculaire afin d'améliorer la durabilité et la résistance à l'humidité, à la pourriture et au feu (Atalla et coll., 2006). La nanotechnologie permet de créer des produits dérivés du bois modifiés à l'échelle moléculaire.

Lignocellulose

La matière lignocellulosique à structure nanofibrillaire est produite à partir de ressources forestières renouvelables et peut servir dans un large éventail de produits commerciaux. Par exemple, la lignocellulose peut être utilisée pour éliminer le phosphore dans des sources ponctuelles et diffuses de pollution de l'eau (Kim et coll., 2006). Cet usage est important pour l'industrie forestière qui pourrait devenir un important fournisseur de lignocellulose à des fins de dépollution. Les systèmes actuels de déphosphatation de l'eau ne sont pas très efficaces. Kim et coll. (2006) ont donc effectué une recherche sur les milieux d'élimination des anions à base de lignocellulose afin de savoir comment ils pourraient les utiliser pour adsorber le phosphore présent à diverses concentrations dans des étendues d'eau polluées. Les résultats obtenus ont révélé que ce type de milieu élimine beaucoup plus efficacement le phosphore que les milieux absorbants les plus efficaces existants. De plus, des études économiques semblent indiquer que ce type de milieu est un moyen très bon marché de déphosphatation de l'eau.

Résistance du bois

Grâce à la nanotechnologie, on peut fabriquer des produits dérivés du bois dotés d'une résistance aux ultraviolets, aux effets du feu, aux ravageurs, à l'humidité et aux champignons. Pour le secteur forestier, cette possibilité a des incidences importantes sur la transformation et la mise au point de produits dérivés du bois. Par exemple, l'humidité provoque la pourriture, le gonflement ou le retrait du bois. Par conséquent, un meilleur contrôle de l'humidité aidera à mettre au point un produit du bois pouvant servir à diverses applications commerciales.

Protection contre les ultraviolets

On peut se servir de la nanotechnologie en modifiant le bois lui-même ou en lui appliquant un revêtement afin d'obtenir des produits du bois plus résistants aux ultraviolets. Antaria Limited a mis au point le nanoZ™, un revêtement industriel transparent d'oxyde de zinc nanoparticulaire qui protège le bois, le plastique et les matières textiles contre les ultraviolets et la dégradation microbienne (http://www.antaria.com/pdfs/nanoz/nanoz_brochure_02.pdf [en anglais seulement]). Il se compose de nanoparticules d'oxyde de zinc qui ne s'agglomèrent pas et ont une distribution granulométrique étroite, d'où une diffraction de la lumière très réduite. Ce produit peut servir à diverses applications dans l'industrie du bois.

Résistance à l'humidité

Nanotec Pty Ltd., entreprise établie en Australie, a mis au point le Nanoseal® Wood, produit principalement utilisé comme hydrofuge et pouvant aussi servir à protéger contre les ultraviolets. Solution aqueuse pour le traitement en surface du bois, le Nanoseal® Wood sert à empêcher les dommages causés par l'eau, mais n'est pas un agent d'étanchéité. Il existe une liaison moléculaire entre les nanoparticules et le substrat. Les nanoparticules forment un filet extrêmement mince qui « repousse » l'eau, est invisible et permet toutefois à la vapeur d'eau de s'évaporer. Le Nanoseal® Wood protège le bois contre la carie, les champignons, la pourriture, les gonflements et les retraits et peut être utilisé à l'intérieur comme à l'extérieur. Il résiste au frottement, ne peut être entraîné par l'eau, des produits de nettoyage ou des lavages haute pression et ne contient ni composé organique volatil, ni solvant, ni pesticide, ni huile (http://veillestrategique.champagne-ardenne.cci.fr/AutoIndex_v1/veilles/archives/Les%20veilles%20sectorielles/Bois%20Info/2006/bois0106_05.html).

Des chercheurs de l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL) du département de l'Énergie des États-Unis ont mis au point une poudre de verre superhydrophobe dont le pouvoir hydrofuge serait jusqu'à présent inégalé (http://www.univ-valenciennes.fr/stimat/pdf/04-2008StimatSuperhydrophobic.pdf). Le produit est en instance de brevet et devrait avoir d'importantes retombées pour les produits commerciaux en raison de sa facilité de fabrication, de son faible coût et de son large éventail d'applications. Le nanomatériau de l'ORNL est un revêtement de silice amorphe qui empêche les solutions liquides de pénétrer dans presque tout type de surface, grâce au traitement du verre à l'aide d'une solution hydrophobe. Les propriétés de la poudre amplifient l'effet de tension superficielle de l'eau et rendent la poudre « non mouillable ». La poudre crée une couche d'air entre la surface qu'elle revêt et le liquide qui s'y dépose. Elle est un isolant électrique et thermique et peut être appliquée à un large éventail de produits, y compris des matériaux dérivés du bois.

À l'heure actuelle, de nombreuses applications utilisent des capteurs d'humidité. Yang et coll. (2006) ont mis au point un nanocapteur d'humidité capable de détecter avec une grande précision les degrés d'humidité dans une substance. Le dispositif utilise des nanopores qui sont incorporés à un capteur à membrane polymère capable de détecter un changement de résistance et de capacité. Les nanopores adsorbent l'eau et altèrent ainsi la résistance et/ou la capacité. Le nanocapteur est en fait constitué d'une paire d'électrodes métalliques qui sont placées par-dessus une couche poreuse

à nanopores. D'après les auteurs, ce dispositif serait idéal sur des toits en bois en raison de sa souplesse, de sa durabilité et de sa grande sensibilité aux dommages dus à l'humidité.

Résistance aux ravageurs

Un produit dérivé du bois résistant aux ravageurs serait très profitable pour l'industrie forestière et, de surcroît, un produit capable d'améliorer un traitement existant de protection contre les ravageurs. Ceux-ci peuvent causer beaucoup de tort aux produits forestiers et à l'économie forestière. Dans le passé, le bois de sciage de pins du Sud traité à l'arséniate de cuivre chromaté (ACC) était un pilier de l'industrie forestière (Laks et Heiden, 2004). Les risques pour l'environnement et la santé associés à l'emploi de ce produit de préservation soulevaient toutefois des inquiétudes. Les biocides organiques contemporains ont une meilleure innocuité pour l'environnement que l'ACC (Yang et coll., 2006), même si les biocides à plus faible coefficient de solubilité peuvent provoquer une irritation cutanée chez l'homme. Laks et Heiden (2004) ont proposé un procédé qui permet d'appliquer des biocides organiques au bois sans causer d'irritation. L'invention consiste à incorporer des biocides de solubilités variées dans des nanoparticules d'une taille donnée, qui sont ensuite intégrées au bois et aux produits forestiers sans causer d'irritation cutanée. Des techniques classiques de préservation sous pression actuellement utilisées pour appliquer des biocides en suspension aqueuse peuvent être utilisées pour forcer des nanoparticules d'une certaine plage de dimensions à pénétrer dans le bois. Les biocides peuvent être des insecticides, des fongicides et des bactéricides. On peut donc utiliser les biocides appropriés et cibler certains organismes. Les nanoparticules imprégnées de biocides peuvent entrer dans la fabrication de produits composites de bois et de produits de bois traités sous pression, comme les panneaux de particules, le contreplaqué et les panneaux de fibres à densité moyenne (MDF). Les méthodes qu'utilise cette invention peuvent également servir à traiter le bois à l'aide d'agents d'ignifugation, comme l'acide borique. D'autres additifs peuvent aussi être incorporés aux nanoparticules, comme des agents hydrofuges, des colorants et des inhibiteurs UV (Laks et Heiden, 2004).

À l'heure actuelle, les produits de préservation du bois ne contiennent pas de chrome afin de réduire au minimum les effets négatifs sur l'environnement. Toutefois, en l'absence de chrome, les biocides sont plus susceptibles de se lessiver et risquent aussi d'avoir des effets néfastes sur l'environnement. De plus, le lessivage des biocides finit par dégrader le produit de bois lui-même (Heiden et coll., 2005). Les préoccupations environnementales associées au lessivage des biocides ont poussé des chercheurs à essayer de trouver des méthodes pour réduire ou éliminer le lessivage des biocides du bois ou des produits forestiers. Heiden et coll. (2005) avaient entrepris un projet de recherche qui était axé sur l'utilisation de la nanotechnologie pour séquestrer le cuivre et les biocides organiques dans le bois et réduire leur lessivage au minimum. Ils ont notamment mis au point une méthode pour incorporer des produits de préservation du bois dans des nanoparticules de polymères qui aident à contrôler le débit de rejet de biocide afin d'éliminer les pertes par lessivage. Les nanoparticules servent de « réservoirs » de biocide ainsi que de « régulateurs » qui fonctionnent par diffusion. L'hydrophobicité des nanoparticules peut être contrôlée, ce qui a pour effet de réguler la vitesse de diffusion. Cette méthode d'application est également utilisable avec des biocides non hydrosolubles.

Un nanoproduit de cuivre a récemment été mis au point et commercialisé en Amérique du Nord à titre de produit de préservation du bois. Matsunaga et coll. (2007) ont comparé la microdistribution du cuivre appliqué à l'aide d'un traitement classique de préservation du bois avec celle du produit à base de nanoparticules de cuivre. L'efficacité des produits de préservation du bois dépend en partie de la capacité du produit à pénétrer la microstructure du bois. Ce projet a permis à Matsunaga et coll. d'arriver à la conclusion que la microdistribution des nanoparticules de cuivre couvrait une plus grande partie de la microstructure du bois que les produits classiques de préservation à base de cuivre. Par conséquent, des nanoparticules de cuivre seraient avantageuses pour l'industrie forestière parce qu'elles sont plus efficaces que les produits classiques de préservation du bois.

Les nanoémulsions sont efficaces dans les préparations de pesticides, notamment lorsqu'elles sont utilisées avec des pesticides non hydrosolubles (Wang et coll., 2007). Une nanoémulsion est un mélange de deux substances qui ne se mélangent pas et qui contiennent des particules de 20 à 200 nm. Elle se compose de gouttelettes de taille très petite et uniforme qui se déposent uniformément sur les feuilles des plantes ciblées. L'efficacité de l'application d'un produit agrochimique donné dépend de son potentiel de dilution lorsqu'on l'utilise et de la capacité de mise en solution qu'il conserve au moment de la dilution. Wang et coll. (2007) ont démontré qu'une nanoémulsion, ayant un pesticide insoluble dans l'eau (bêta-cyperméthrine), conserve sa capacité de mise en solution au moment de la dilution. D'après les résultats obtenus, les nanoémulsions seraient un excellent véhicule pour l'application de la bêta-cyperméthrine. Elles peuvent libérer plus de particules par jet, on réduit donc la quantité de pesticides à appliquer sur l'organisme cible tout en maintenant le degré d'efficacité.

Une peinture antimicrobienne à nanoparticules d'argent a récemment été mise au point et peut être utilisée comme

Nanocristaux de cellulose broyés au broyeur à boulets pour renforcer les vernis.

revêtement sur le bois, le verre, l'acier et les surfaces polymériques (Kumar et coll., 2008). L'argent est un biocide efficace contre plusieurs bactéries, champignons et virus en raison de sa faible toxicité pour les cellules humaines, de sa stabilité thermique élevée, de sa faible volatilité et de sa durabilité. Les nanoparticules d'argent ont un rapport surface/volume élevé qui assure une plus grande efficacité antibactérienne. Kumar et coll. (2008) ont mis au point cette peinture à nanoparticules d'argent qui se veut un produit écologique dont la fabrication peut se faire en une seule étape.

Nouveaux procédés et techniques

La nanotechnologie est susceptible de révolutionner nombre des procédés de fabrication actuellement utilisés dans l'industrie forestière, de la fabrication de la pâte et du papier à la transformation du bois (Atalla et coll., 2006). Des concepts novateurs et des modifications des procédés actuels pourraient révolutionner la fabrication ascendante dans une industrie qui fonctionne surtout de manière descendante. L'industrie forestière pourrait profiter considérablement de cette transformation, mais pour que celle-ci se concrétise, il sera important que l'industrie des produits forestiers mette en commun avec les autres secteurs industriels les nano-outils d'analyse et les connaissances en nanotechnologie.

Nano-indentation

Dans le cas des applications de la nanotechnologie, il est important de comprendre les propriétés et la structure du produit d'intérêt à l'échelle nanométrique. À ce jour, les efforts déployés par les chercheurs pour tenter de modifier et de contrôler le comportement du bois à titre de produit industriel se sont heurtés à la complexité du bois. La nano-indentation est une technique qui peut faciliter cette tâche et servir à vérifier les propriétés mécaniques d'une surface à une échelle micrométrique ou submicrométrique (Moon et coll., 2006). Elle mesure principalement la dureté des matériaux d'intérêt (http://www.nanoindentation.cornell.edu/Introduction/Nanoindentation-Introduction.htm [en anglais seulement]). Elle consiste à placer une pointe dure dans un échantillon et à appliquer une charge donnée. Une fois la pointe retirée, on mesure la taille de l'empreinte laissée à la surface et on peut calculer la dureté. Cette technique de caractérisation peut également servir à étudier les propriétés mécaniques du bois. Par exemple, la résistance à l'usure et la résistance au choc sont deux caractéristiques importantes des parquets. La densification du bois, la modification de ses propriétés chimiques et l'imprégnation du bois avec de la résine peuvent en améliorer la dureté (Moon et coll., 2006). L'étude des caractéristiques mécaniques et du mode d'action de ces procédés sur les parois cellulaires du bois permettrait de rendre plus efficace un procédé précis de durcissement. Gindl et coll. (2004) ont utilisé la nano-indentation pour déterminer que le phénol-formaldéhyde (PF), contrairement au diisocyanate de diphénylméthane prépolymérisé (pMDI), se diffusait dans les parois cellulaires du bois. La nano-indentation a permis de découvrir que les cellules de PF avaient une dureté plus élevée que celles du pMDI (Gindl et coll., 2004). En plus de mesurer la dureté, la nano-indentation offre un moyen de mesurer les modifications mécaniques qui surviennent durant la décomposition du bois (Kumar et coll., 2008). L'étude des processus mécaniques de la décomposition et de la dégradation du bois pourrait déboucher sur des méthodes de prévention. Plusieurs études ont fait appel à la nano-indentation pour évaluer la lignification des parois cellulaires (Gindl et coll., 2002), la modification de la mélamine (Gindl et Gupta 2002) et les propriétés mécaniques des fibres ligneuses indigènes (Tze et coll., 2007).

Technique de nanorevêtement couche par couche

La technique de nanorevêtement couche par couche permet de déposer à la surface d'un matériau une pellicule extrêmement mince de polyélectrolytes, de protéines ou de nanoparticules. Lu et coll. (2007) ont utilisé cette technique pour revêtir des produits de pâte Kraft de résineux de plusieurs couches de nanotubes de TiO_2, de SiO_2 et d'halloysite (argile). Ils ont comparé les produits de papier ainsi obtenus avec un témoin et ont constaté que le papier nanorevêtu avait un degré de blancheur et une porosité beaucoup plus élevés que le papier témoin. La porosité élevée du papier ainsi nanorevêtu crée des possibilités d'applications à exploiter dans le secteur pharmaceutique et biomédical. Ce procédé de revêtement pourrait donc être fort prometteur pour l'industrie des pâtes et papiers.

Pâtes et papiers

La nanotechnologie présente un potentiel énorme pour l'industrie des pâtes et papiers. Le papier intelligent, les méthodes de réduction des émissions de l'industrie papetière ainsi que des améliorations de l'imprimabilité et de l'opacité font l'objet de travaux de recherche (Agarwal et coll., 2006).

Papier intelligent

Agarwal et coll. (2006) qualifient le papier intelligent d'électriquement conducteur et examinent une méthode pour obtenir un revêtement conducteur contrôlé pour des microfibres de lignocellulose qui peuvent être incorporées au papier grâce à la technique de nanorevêtement couche par couche. À l'heure actuelle, le papier conducteur peut être fonctionnel et stable pendant plus de six mois. Ce type de recherche sera notamment utile à la production de dispositifs électroniques, de condensateurs, de bobines d'induction et de transistors. Le nanorevêtement conducteur de fibres ligneuses peut servir à la mise au point de capteurs, de dispositifs de communication et de papier électronique. La poursuite de la recherche dans ce domaine promet de révolutionner l'industrie des pâtes et papiers.

Les chercheurs utilisent la nanotechnologie pour mettre au point des circuits transistorisés transparents applicables au « papier électronique » (http://www.sciencedaily.com/releases/2007/06/070626140339.htm [en anglais seulement]). Ju et coll. (2007) ont mis au point des nanofils entièrement transparents qui, outre leur extraordinaire transparence, offrent une excellente flexibilité et une performance remarquable. De plus, les nanofils peuvent être intégrés au papier pour créer des produits de papier conducteurs, utilisables, flexibles et transparents.

Systèmes de filtration

La nanofiltration est un procédé de séparation par membrane effectué par l'application d'une pression qui assure une excellente ségrégation des ions. Elle peut servir à gérer ou à traiter l'eau et peut séparer de manière très sélective les ions présents dans l'eau. Ce type de filtration de l'eau fournit un moyen concurrentiel de gestion des eaux usées de l'industrie des pâtes et papiers (Puurunen et Vasara, 2007). L'eau utilisée par les procédés de fabrication de pâtes et papiers peut être recyclée afin de réduire la consommation d'eau, une mesure plus écologique qui réduit également les coûts de l'industrie.

Couchage du papier

La nanotechnologie peut servir à améliorer certains aspects de la qualité du papier. TopChim, société spécialisée dans la fabrication d'emballages cartonnés et de papier, a mis au point un traitement de surface du papier, appelé NanoTope et fondé sur la nanotechnologie. Une fois appliqué, le produit donne au papier un fini glacé, une blancheur élevée et de la rigidité (http://www.topchim.com/zeta.pdf [en anglais seulement]). Le papier traité au NanoTope fixe mieux l'encre, ce qui permet une meilleure résolution et une densité d'impression plus élevée. De plus, ce produit a une bonne imprimabilité.

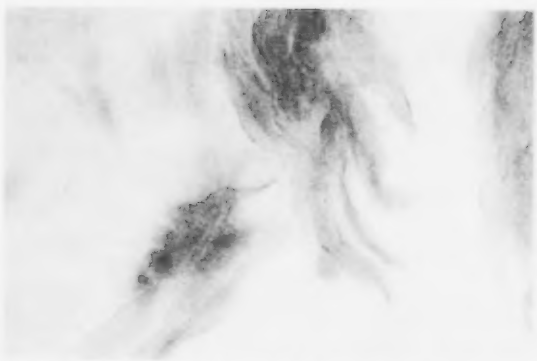
Un nanorevêtement hydrofuge sous forme d'aérosol pulvérisable a été mis au point pour le papier et se compose de polymères et de cires hydrophobes. Après pulvérisation, une nanostructure se forme lors du séchage par autoassemblage des nanoparticules (http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/leffet-lotus-sous-forme-daerosol_1789/). Cette nanostructure fait obstacle à l'eau, propriété qui peut être utile dans de nombreuses applications.

Risques pour l'environnement et la santé humaine

À mesure que la nanotechnologie gagne en popularité dans les sphères industrielles et commerciales, il est essentiel d'analyser les risques pour l'environnement et la santé humaine. L'étude des risques associés à la nanotechnologie nous permettra d'être mieux à même de comprendre les voies d'exposition et les problèmes potentiels de sécurité associés à son utilisation.

Le nombre de publications portant sur la mise au point de matériaux nanoparticulaires est beaucoup plus élevé que le nombre d'études toxicologiques effectuées. Cet écart se comble à mesure que croissent les préoccupations des scientifiques à l'égard des incidences de la nanotechnologie. M. Dietram Scheufele affirme que les scientifiques disent ne pas savoir s'il y a des problèmes parce que la recherche n'a pas été effectuée (Scheufele et coll., 2007). Il semble toutefois que les nanoparticules peuvent avoir des effets néfastes sur les humains, les animaux et l'environnement. Ainsi, Oberdörster et coll. (2005) ont montré que les nanoparticules, en raison d'un rapport surface/volume très élevé, peuvent être biologiquement plus actives que d'autres molécules plus grandes et peuvent pénétrer dans le corps humain. M. Scheufele a aussi recensé le nombre d'articles sur la nanotechnologie publiés dans les principaux journaux en 2004, 2005 et 2006 (http://www.nanolawreport.com/2007/12/articles/new-nano-public-opinion-poll-published-in-nature-nanotechnology [en anglais seulement]). Il a ensuite comparé le nombre d'articles dans lesquels on mentionnait les risques pour l'environnement, la santé et la sécurité ou la réglementation de la nanotechnologie avec le nombre total d'articles qu'il avait recensés, soit 1 200. De ce total, seulement quelque 20 % des articles faisaient état des risques potentiels pour l'environnement, la santé et la sécurité ou de la réglementation de la nanotechnologie.

Les effets néfastes de la nanotechnologie préoccupent un peu moins le public que les scientifiques (Scheufele et coll., 2007), et ce décalage pourrait nuire à l'avenir de la nanotechnologie. Le grand public semble très peu connaître la nanotechnologie. Il existe de nombreux types de nanomatériaux et



Vernis renforcé d'argile nanométrique

jusqu'à maintenant, leur production ou leur utilisation n'est pas beaucoup réglementée. De plus, en raison de leur grande diversité, il est pratiquement impossible d'adopter une réglementation-cadre et de les regrouper dans une même catégorie. Aux États-Unis, les fiches signalétiques de la majeure partie des nanomatériaux sont identiques à celles des macromatériaux ou des matériaux en vrac (Colvin, 2003).

Il importe d'examiner les voies d'exposition directe et indirecte lors de l'étude des effets environnementaux et toxicologiques de la nanotechnologie. L'accroissement de la demande de nanomatériaux ira de pair avec l'augmentation de la production et de la possibilité d'exposition. Il est donc nécessaire d'analyser comment les humains, les animaux et l'environnement peuvent entrer en contact avec les nanomatériaux manufacturés à mesure que la nanotechnologie devient de plus en plus répandue dans l'industrie (Colvin, 2003). L'exposition professionnelle peut représenter un risque important étant donné que les mesures de sécurité associées à l'utilisation de nanoparticules sont souvent les mêmes que celles pour les matériaux en vrac de la même composition. C'est un aspect important, car les nanoparticules ne se comportent pas comme leurs équivalents de plus grandes dimensions. Elles possèdent des caractéristiques physiques uniques et sont soumises à des forces physiques différentes. Il faudrait donc élaborer des restrictions spécifiques adaptées au milieu de travail afin de tenir compte des dimensions des nanoparticules et de leurs propriétés correspondantes.

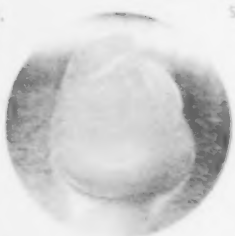
Compte tenu du très grand nombre d'applications auxquelles les nanoparticules sont promises, il est important de se préoccuper de la façon dont elles se comportent lorsqu'elles pénètrent dans l'environnement. L'utilisation à grande échelle prévue de nanoparticules manufacturées dans les produits de consommation entraînera inévitablement une augmentation des taux d'exposition dans les milieux de travail, dans les lieux publics et dans l'environnement. Il est capital de cerner les risques possibles pour la santé humaine et l'environnement et de les médiatiser. Il est aussi important d'entreprendre des travaux de recherche pertinents sur la toxicité et l'effet des nanoparticules en général.

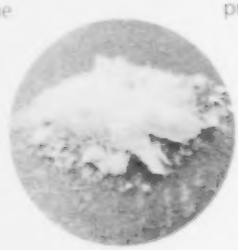
Survol des initiatives de recherche en nanotechnologie

Initiatives nationales de recherche

Au Canada, la nanotechnologie devient un domaine de recherche plus prioritaire (Bureau du conseiller national des sciences, 2007). La nanotechnologie est une discipline en plein essor, et les mesures incitatives mises en place en Alberta et au Québec mènent la recherche en nanotechnologie au Canada. Le gouvernement du Canada est le principal bailleur de fonds de la recherche et verse des subventions à la recherche universitaire et à des chaires de recherche et assure aussi un financement direct pour la mise en place de l'infrastructure physique nécessaire à la recherche (à savoir, les installations et équipements nouveaux). Au cours des dix dernières années, le fédéral et les provinces ont investi environ 641 millions de dollars dans la recherche en nanotechnologie.

La nanotechnologie est l'un des domaines de recherche du portefeuille de R-D du gouvernement fédéral qui a connu la croissance la plus rapide depuis quelques années. Des agences et organismes fédéraux, comme le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG), les Instituts de recherche en santé du Canada (IRCS), la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) et le Conseil national de recherches du Canada (CNRC), versent d'importantes sommes à la recherche en nanotechnologie. En 2005–2006, le CRSNG a versé environ 20,9 millions de dollars à la recherche dans ce domaine. Au cours des dix dernières années, il a finance quelque 1 200 projets axés sur le génie des matériaux, la nanoélectronique et la photonique. Les IRCS mettent davantage l'accent sur la recherche nanomédicale, y compris l'imagerie moléculaire, l'imagerie clinique, les biomateriaux et l'administration de médicaments, et ont investi 35,4 millions de dollars depuis 2000. La FCI a été mise sur pied par le gouvernement du Canada afin de financer les universités et les établissements de recherche canadiens. Le gouvernement du Canada a alloué 3,65 milliards de dollars à la FCI depuis 1997, un financement qui devrait atteindre les 11 milliards de dollars d'ici 2010. Quelque 107 millions du financement versé par le gouvernement à la FCI ont été consacrés à 173 projets de recherche en nanotechnologie ayant pour thème la nanoélectronique. Le CNRC est le chef de file du fédéral de la R-D au Canada. Il a investi environ 20 millions de dollars dans la recherche en nanotechnologie en 2005–2006 et a versé quelque 25 millions de dollars à des programmes de recherche en nanotechnologie, y compris les 2,7 millions de dollars consacrés au Programme de détections des pathogènes de l'Initiative en génomique et en santé du CNRC, qui est basée sur la biotechnologie. Au sein de Ressources naturelles Canada, trois projets, approuvés par le système habituel des sciences et technologie, sont au cœur des stratégies de R-D en nanotechnologie et ne sont donc pas expressément finances comme projets de nanotechnologie : nanotechnologie liée aux changements climatiques, nanotechnologie des capteurs, des servocommandes, des revêtements et des composites à haute performance, et applications de la nanoscience aux technologies de l'énergie.





Le Service canadien des forêts, par le biais du Programme des technologies transformatrices, consacre sur trois années financières (2007–2010) plus de 3 millions de dollars par année pour mener des travaux de recherche sur la cellulose nanocristalline. Les projets de R-D seront réalisés par FPInnovations et ses partenaires. Les objectifs des travaux de recherche seront les suivants : 1. fabrication d'une cellulose nanocristalline, 2. mise au point d'applications pour la cellulose nanocristalline, 3. application de la cellulose nanocristalline aux procédés de transformation des produits forestiers, 4. examen des préoccupations liées aux risques pour l'environnement, la santé et la sécurité associés aux applications de la cellulose nanocristalline, et 5. applications chimiques pour la nouvelle génération de solutions de construction, y compris l'amélioration de la résistance au feu d'adhésifs pour bois de

En haut : Un pour cent de nanocristaux de cellulose dans l'eau forme une suspension colloïdale stable.

Au milieu : Une suspension de 7 % de nanocristaux de cellulose dans l'eau forme un gel.

En bas : Nanocristaux de cellulose purs lyophilisés.

charpente au moyen de modifications chimiques et de la nanotechnologie ainsi que la densification superficielle et l'imprégnation au moyen de la nanotechnologie.

À l'échelon provincial, les travaux en nanotechnologie sont principalement réalisés en Alberta, au Québec, en Colombie-Britannique et en Ontario et représentent 95 % des initiatives de recherche menées dans ce domaine au Canada. L'Alberta a classé la nanotechnologie comme un domaine de recherche prioritaire et lui a affecté 130 millions de dollars pour les trois prochaines années — dont 30 millions seront consacrés à un programme de premier cycle en nanotechnologie pour stimuler l'intérêt dans ce secteur en développement. La Stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation du gouvernement du Québec a désigné la nanotechnologie comme un domaine de recherche prioritaire. NanoQuébec est organisme directeur créé en 2001 pour faire le lien entre le monde universitaire, le gouvernement et l'industrie au Québec (http://www.nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/fiche/12692). NanoQuébec élabore actuellement un programme d'appui à la R-D en nanotechnologie dans le secteur forestier, en partenariat avec FPInnovations. Les deux principaux thèmes du programme sont le secteur de la transformation du bois et le secteur des pâtes et papiers. Le budget total du programme est de plus de 1 million de dollars. NanoQuébec et FPInnovations se sont engagés à investir respectivement 400 000 $ et 300 000 $ dans ce programme. Des sources de financement additionnelles, dont le CRSNG, totaliseront plus de 300 000 $ (NanoQuébec, 2008a). Le choix des projets du CRSNG devrait être terminé en janvier 2009 (NanoQuébec, 2008a).

Les Réseaux de centres d'excellence dirigés par l'entreprise constituent un programme assez récent qui fournira 46 millions de dollars sur quatre ans à cinq groupes choisis de recherche en nanotechnologie (NanoQuébec, 2008a). Il s'agit d'une initiative conjointe d'Industrie Canada, du CRSNG, du Conseil de recherches en sciences humaines du Canada et des IRSC. Le réseau des nanoproduits de la forêt canadienne (ArboraNano) figure actuellement parmi les dix groupes dont la demande de financement est à l'étude. Ce réseau vise à instaurer une nouvelle bioéconomie canadienne en utilisant nos vastes ressources forestières durables et des concepts nanotechnologiques avancés pour créer des produits novateurs de grande valeur dans de nombreux secteurs manufacturiers différents (NanoQuébec, 2008b).

En Colombie-Britannique, l'Université Simon Fraser a inauguré de nouvelles installations qui se spécialiseront en nanotechnologie, plus précisément les procédés et les phénomènes à nanoéchelle, un axe de recherche qui représente environ 20 % de l'ensemble des incitatifs versés à la recherche en nanotechnologie au Canada. L'Ontario ne dispose pas encore d'une stratégie de recherche, mais le gouvernement provincial prend des mesures pour aller de l'avant avec la recherche en nanotechnologie.

La nanotechnologie est un important domaine émergent de R-D, et le Canada s'emploie à élaborer des stratégies en conséquence. L'avenir de la nanotechnologie reste à découvrir, et le Canada commence à jouer un rôle proactif dans sa découverte.

Initiatives internationales de recherche

À l'échelon international, les États-Unis, le Japon et l'Union européenne sont les chefs de file des investissements en nanotechnologie (Shand et Wetter, 2006). Uniquement en 2005, le gouvernement des États-Unis a investi quelque 1 081 millions de dollars dans la R-D en nanotechnologie, tandis que l'Union européenne et le Japon ont investi respectivement 1 050 et 950 millions de dollars. Grâce au lancement de l'initiative américaine de nanotechnologie (National Nanotechnology Initiative [NNI]) en 2001, la nanotechnologie est devenue un secteur prometteur et en plein essor où investir. Depuis la mise sur pied de la NNI, les États-Unis ont consacré plus de 5 milliards de dollars à la R-D en nanotechnologie. Il s'agit de la deuxième plus importante initiative scientifique financée par des fonds publics, après l'atterrissage sur la Lune de la mission Apollo (Shand et Wetter, 2006).

Conclusions

La nanotechnologie s'annonce très prometteuse dans de nombreux domaines, y compris le secteur forestier. Pour relever les défis associés à l'avenir de la nanotechnologie dans les divers secteurs d'application, il est essentiel que l'industrie, les milieux universitaires et la société collaborent. Et comme la nanotechnologie puise dans plusieurs disciplines, les différents secteurs doivent contribuent à enrichir l'information et les techniques afin de faire progresser le développement de la nanotechnologie. À ce jour, la nanotechnologie a offert de nombreuses possibilités à exploiter qui continuent de se multiplier dans de nombreux secteurs. Dans le secteur forestier, elle promet de déboucher sur la création de nouveaux matériaux et de méthodes plus efficaces de transformation du bois ainsi que sur des procédés permettant d'améliorer la résistance aux ravageurs et à l'humidité du bois et de réduire la dégradation causée par les ultraviolets. Le milieu de la recherche forestière vit une époque passionnante, car la nanotechnologie est un domaine relativement nouveau et offre un potentiel prodigieux. Pourtant, comme pour toute nouvelle discipline, il est important d'évaluer les risques que peut poser la nanotechnologie pour les humains, les animaux et l'environnement. À l'heure actuelle, il est important et nécessaire d'élaborer un cadre de réglementation. Pour s'assurer que la nanotechnologie sera un outil précieux dans

l'avenir, il faut mieux comprendre les incidences de son utilisation et les risques lui y sont associés.

Bibliographie

Agarwal, M.; Lvov, Y.; Varahramyan, K. 2006. Conductive wood microfibres for smart paper through layer-by-layer nanocoating [version imprimée et en ligne]. Nanotechnology 17:5319–5325. http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/17/21/006 (consulté en décembre 2008).

Atalla,R.; Beecher, J.; Caron, R.; Catchmark, J.; Deng, Y.; Glasser, W.; Gray, D.; Haigler, C.; Jones, P.; Joyce, M.; Kohlman, J.; Koukoulas, A.; Lancaster, P.; Perine, L.; Rodriguez, A.; Ragauskas, A.; Wegner, T.; Zhu, J. 2006. Nanotechnology for the forest products industry. Vision and technology roadmap. Agenda 2020 Technology Alliance. [en ligne] http://www.agenda2020.org/PDF/fp_nanotechnology.pdf (consulté en décembre 2008).

Beecher, J. 2007. Organic materials: Wood, trees and nanotechnology [version imprimée et en ligne]. Nat. Nanotechol. 2:466–467. http://www.nature.com/nnano/journal/v2/n8/full/nnano.2007.239.html (consulté en décembre 2008).

Bhatnagar, A.; Sain, M. 2005. Processing of cellulose nanofiber-reinforced composites. J. Reinf. Plast. Compos. 24:1259–1268.

Colvin, V. 2003. The potential environmental impact of engineered nanomaterials [version imprimée et en ligne]. Nat. Biotechnol. 21:1166–1170. http://nanonet.rice.edu/publications/2003/Colvin_The_Potential_Enviornmental.pdf (consulté en octobre 2008).

Gindl, W.; Gupta, H. S. 2002. Cell-wall hardness and Young's modulus of melamine-modified spruce wood by nano-indentation. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 33:1141–1145.

Gindl, W.; Gupta, H.S.; Grünwald, C. 2002. Lignification of spruce tracheid secondary cell walls related to longitudinal hardness and modulus of elasticity using nano-indentation. Can. J. Bot. 80:1029–1033.

Gindl, W.; Schöberl, T.; Jeronimidis, G. 2004. The interphase in phenol-formaldehyde and polymeric methylene diphenyl-di-isocyanate glue lines in wood. Int. J. Adhes. Adhes. 24:279–286.

Heiden, P.; Matuana, L.; Dawson-Andoh, B. 2005. Nanotechnology. A novel approach to prevent biocide leaching. [en ligne] http://es.epa.gov/ncer/publications/workshop/10_26_05/abstracts/heiden.html (consulté en décembre 2008).

Ju, S.; Facchetti, A.; Xuan, Y.; Liu, J.; Ishikawa, F.; Ye, P.; Zhou, C.; Marks, T.; Janes, D. 2007. Fabrication of fully transparent nanowire transistors for transparent and flexible electronics. Nat. Nanotechnol. 2:378–384.

Kim, J.; Mann, J.D.; Kwon, S. 2006. Enhanced adsorption and regeneration with lignocellulose-based phosphorus removal media using molecular coating nanotechnology. J. Environ. Sci. Health Part A Toxic-Hazard Subst. Environ. Eng. 41:87–100.

Kumar, A.; Vemula, P.; Ajayan, P.; John, G. 2008. Silver-nanoparticle-embedded antimicrobial paints based on vegetable oil. Nat. Mater. 7:236–241.

Laks, P.; Heiden, P. 2004. Compositions and methods for wood preservation. United States Patent 6753035 issued 22 June 2004. [en ligne] http://www.patentstorm.us/patents/6753035.html (consulté en octobre 2008).

Lu, Z.; Eadula, S.; Zheng, Z.; Xu, K.; Grozdits, G.; Lvov, Y. 2007. Layer-by-layer nanoparticle coatings on lignocellulose wood microfibers. Colloids Surf. A Physico-Chem. Eng. Aspects 292:56–62.

Matsunaga, H.; Kiguchi, M.; Evans, P. 2007. Micro-distribution of metals in wood treated with a nano-copper wood preservative. The International Research Group on Wood Protection. Section 4. Processes and Properties. Paper prepared for the 38th Annual Meeting, Jackson Lake Lodge, Moran, Wyoming.

Moon, R.J.; Frihart, C.R.; Wegner, T. 2006. Nanotechnology applications in the forest products industry [version imprimée et en ligne]. For. Prod. J. 56:4–10. http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2006/fpl_2006_moon001.pdf. (consulté en janvier 2009).

Nakagaito, A.; Yano, H. 2004. The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites. Appl. Phys. A Mater. Sci. Proc. 78: 547–552.

NanoQuébec, 2008a. Rapport annuel 2007–2008. [en ligne] http://www.nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/fiche/12692 (consulté en octobre 2008).

NanoQuébec, 2008b. Programme d'appui à la R&D dans le secteur forestier. Pièces jointes. [en ligne] http://nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/fiche/12818; Arboranano Network — 29 octobre 2008. (consulté en décembre 2008).

NanoQuébec, 2009. Glossaire terminologique. [en ligne] http://www.nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/explorateur.jsp?currentlySelectedSection=259&NOPRESERVElanguageID=1. (consulté en février 2009).

Noorani, S.; Simonsen, J.; Atre, S. 2007. Nano-enabled microtechnology: Polysulfone nanocomposites incorporating cellulose nanocrystals. Cellulose 14:577–584.

Oberdörster, G.; Oberdörster, E.; Oberdörster, J. 2005. Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles [version imprimée et en ligne]. Environ. Health Perspect. 113:823–839. http://www.ehponline.org/members/2005/7339/7339.html (consulté en octobre 2008).

Bureau du conseiller national des sciences, 2007. Overview of nanotechnology research funding in Canada 2006. Ottawa. 28 p.

Puurunen, K.; Vasara, P. 2007. Opportunities for utilizing nanotechnology in reaching near-zero emissions in the paper industry. J. Clean. Prod. 15:1287–1294.

Scheufele, D.; Corley, E.; Dunwoody, S.; Shih, T.; Hillback, E.; Guston, D. 2007. Scientists worry about some risks more than the public [version imprimée et en ligne]. Nat. Nanotechnol. 2:732–734. http://www.nature.com/nnano/journal/v2/n12/abs/nnano.2007.392.html (consulté en octobre 2008).

Shand, H.; Wetter, K.J. 2006. Shrinking science: An introduction to nanotechnology. Pages 78–95 *in* Linda Starke ed. State of the world 2006: A Worldwatch Institute report on progress toward a sustainable society. W.W. Norton & Company Inc., New York, NY. 244 p.

Tze, W.T.Y.; Wang, S.; Rials, T.G.; Pharr, G.M.; Kelley, S.S. 2007. Nanoindentation of wood cell walls: Continuous stiffness and hardness measurements. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 38:945–953.

Wang, B.; Sain, M. 2007. Dispersion of soybean stock-based nanofiber in a plastic matrix. Polym. Int. 56:538–546.

Wang, B.; Sain, M.; Oksman, K. 2007. Study of structural morphology of hemp fiber from the micro to the nanoscale. Appl. Compos. Mater. 14:89–103.

Wang, L.; Li, X.; Zhang, G.; Dong, J.; Eastoe, J. 2007. Oil-in-water nanoemulsions for pesticide formulations. J. Colloid Interface Sci. 314:230–235.

Wegner, T.; Jones, P. 2006. Advancing cellulose-based nanotechnology. Cellulose 13:115–118.

Yang, B.; Aksak, B.; Lin, Q.; Sitti, M. 2006. Compliant and low-cost humidity nanosensors using nano-porous polymer membranes. Sens. Actuator. B Chem. 114:254–262.